



Commande “ sans modèle ” pour l’asservissement numérique d’un banc de caractérisation magnétique

Loïc Michel, Olivier Ghibaudo, Messal Oualid, Afef Lebouc, Cédric Boudinet,
François Blache, Antoine Labonne

► To cite this version:

Loïc Michel, Olivier Ghibaudo, Messal Oualid, Afef Lebouc, Cédric Boudinet, et al.. Commande “ sans modèle ” pour l’asservissement numérique d’un banc de caractérisation magnétique. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361644

HAL Id: hal-01361644

<https://hal.science/hal-01361644>

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Commande « sans modèle » pour l'asservissement numérique d'un banc de caractérisation magnétique

Loïc Michel, Olivier Ghibaudo, Oualid Messal, Afef Kedous-Lebouc,
Cédric Boudinet, François Blache et Antoine Labonne
Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

RESUME – Dans cet article, nous présentons une stratégie innovante d'asservissement numérique destinée à piloter un banc de caractérisation de matériaux magnétiques doux de type cadre Epstein. L'objectif est d'imposer la forme de l'induction magnétique quelle que soit l'excitation et le matériau. Compte-tenu du caractère non-linéaire des courbes d'aimantation des matériaux magnétiques, une commande originale de type « sans modèle » est considérée. Les propriétés dynamiques en boucle fermée permettent d'assurer une certaine robustesse vis-à-vis des modifications du point de fonctionnement associées essentiellement à la forme de l'hystérésis magnétique. Le fonctionnement et les performances de l'asservissement sont illustrés à la fois par des simulations basées sur le modèle d'hystérésis magnétique de Jiles-Atherton et expérimentalement.

Mots-clés – Asservissement numérique, cadre Epstein, caractérisation magnétique, commande sans modèle.

1. INTRODUCTION

Pour l'étude du comportement d'alliages magnétiques notamment dans des conditions d'applications et pour des besoins de modélisation, nous sommes souvent amenés à effectuer des mesures expérimentales en considérant différentes formes d'ondes d'induction (par exemple, sinus, triangle, etc). Pour cela, les expérimentations sont généralement réalisées au moyen du cadre Epstein. Ce dispositif, normalisé, permet de caractériser des matériaux magnétiques doux sur une large plage de fréquence [DC - qq dizaines de kHz], pour différentes formes d'ondes et différents niveaux d'induction. Le principe est de créer un champ magnétique H dans le matériau grâce à un courant d'excitation i_H . Le matériau donne une réponse magnétique qui correspond physiquement à l'induction magnétique B obtenue après intégration numérique de la tension v_B mesurée aux bornes du bobinage de mesure (Fig. 1).

Pour décrire expérimentalement un cycle d'hystérésis majeur à saturation traduisant une forte non linéarité, l'alimentation linéaire de puissance utilisée est capable de fournir le courant primaire i_H (image du champ magnétique) et d'imposer, indirectement, la tension secondaire v_B (image de l'induction magnétique). Afin de satisfaire des conditions de mesures expérimentales qui soient au plus proche des règles normatives, il est nécessaire de respecter un facteur de forme FF_{v_B} (1) qui en régime sinusoïdal doit être inférieur à 1%. Ce facteur correspond au rapport de la valeur efficace sur la valeur moyenne du signal redressé. Il vaut $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,107$ pour un signal parfaitement sinusoïdal. Nous l'exprimons en % par commodité et nous le généralisons à tout type de forme d'onde (2). Ainsi 0% signifie que le signal a la forme théorique recherchée. Durant les essais, l'objectif est d'assurer des formes d'ondes imposées sur l'induction magnétique (i.e. la tension v_B aux bornes de la bobine de mesure), sachant d'une part que le matériau à caractériser possède un comportement non linéaire, et d'autre part, que le cadre Epstein n'est pas une inductance pure (résistance parasite et inductance de fuite).

$$FF_{v_B} = \frac{v_{B_{eff}}}{<|v_B|>} \quad (1)$$

$$FF_{v_B}(\%) = 100 \times \left(\frac{FF_{v_B} - FF_{Théorique}}{FF_{Théorique}} \right) \quad (2)$$

Pour contrôler la forme de l'induction B (i.e. v_B), il est nécessaire de recourir à un asservissement soit analogique soit numérique, de manière à modifier la forme d'onde de la tension de commande v_{carte} envoyée sur l'alimentation de puissance (Fig. 1). L'asservissement numérique est ici privilégié car il assure une bonne reproductibilité, réduit les sources d'auto-oscillations, « gère » le bruit mesuré sur la chaîne de mesure et enfin permet d'asservir la mesure d'induction B (i.e. v_B) en prenant en compte numériquement la compensation du flux dans l'air. La manière usuelle d'implémenter un contrôleur numérique est de calculer la forme de la commande v_{carte} à appliquer pour avoir une induction maîtrisée par une procédure généralement itérative [1], [2]. Par ailleurs, il existe dans la littérature différentes méthodes numériques pour asservir des bancs de caractérisation magnétique. Par exemple, certains travaux utilisent des compensations multi-harmoniques pour corriger la forme de l'induction. Ces derniers sont restreints aux signaux sinusoïdaux [3], ou bien font appel à une correction complexe et intrinsèquement peu stable des phases associées aux harmoniques des signaux traités [4]. D'autres travaux [5] requièrent au préalable une identification supplémentaire des éléments du schéma électrique équivalent au circuit magnétique à caractériser.

Pour asservir diverses formes d'ondes, nous proposons dans cet article une méthode basée sur une commande de type « sans modèle » dans le but d'asservir les grandeurs représentatives de l'hystérésis magnétiques mesurées sur un cadre Epstein. L'objectif est d'appliquer la stratégie d'asservissement numérique « para-modèle » qui calcule la forme d'onde de v_{carte} afin de d'imposer la forme de v_B à une consigne d'asservissement de forme préalablement définie (typiquement sinusoïdale ou rectangulaire), ceci dans le but de diminuer les distorsions harmoniques sur les formes d'ondes mesurées.

Proposée initialement par Fliess et Join [6], [7], cette commande sans modèle a été appliquée avec succès pour l'asservissement de nombreux systèmes multi-physiques (voir notamment [7] pour une liste non-exhaustive d'applications). Décrite comme une commande auto-ajustante ("self-tuning controller") dans [8], elle prévoit l'estimation d'un modèle ultra-local dont le but est d'approximer le système à commander par une loi linéaire comportant la dérivée de la sortie contrôlée. La première application pour la commande des convertisseurs de puissance [9] a notamment permis de développer une version modifiée de la loi de commande « sans modèle », qui introduit une unique fonction d'initialisation en lieu et place de la dérivation temporelle [10].

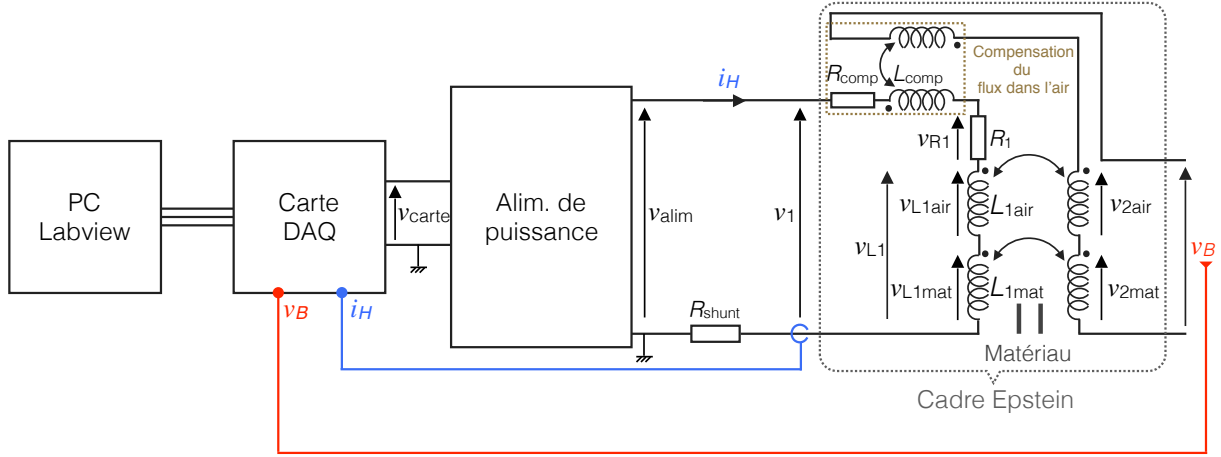


Fig. 1. Instrumentation et circuit électrique associés au cadre Epstein.

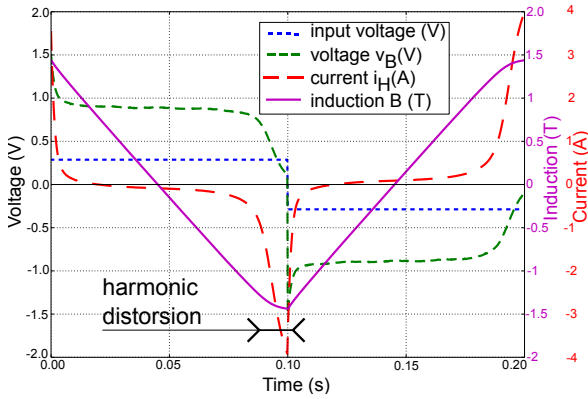


Fig. 2. Mesures sur cadre Epstein réalisées sans asservissement sur des tôles FeSi-NO à 5 Hz. La consigne de tension (input voltage = v_{carte}) est imposée rectangulaire en entrée de l'alimentation de puissance de manière à avoir une induction triangulaire. La distortion harmonique sur B est visible pour des niveaux qui approchent la saturation du matériau.

2. ASSERVISSEMENT NUMÉRIQUE « SANS MODÈLE »

2.1. De la commande PID à une commande « sans modèle »

La commande sans modèle, ou correcteur i-PI (pour « correcteur PI intelligent »), est une méthode originale et récente [7] qui permet de rendre *a priori* robuste une loi de contrôle classique de type PID par rapport aux incertitudes et dérives du modèle commandé. L'intérêt principal de cette méthode [11] réside dans :

- la simplicité (en comparaison avec la théorie de la commande robuste) avec laquelle un correcteur PID, dit intelligent, est mis en œuvre ;
- la faculté de cette loi de commande à stabiliser et maintenir des performances dynamiques très intéressantes lors de fortes perturbations du modèle commandé.

Une telle loi de commande ne nécessite que peu de réglages pour une (relativement) bonne efficacité et n'est pas directement corrélée au modèle à piloter. Bien que ses paramètres doivent être ajustés en fonction du modèle, on peut vérifier expérimentalement que, pour un jeu de paramètres donné, les performances dynamiques et statiques sont très intéressantes dans une large gamme de dérive des paramètres du modèle nominal. Les dernières avancées tendent à simplifier la commande « sans modèle » originale [7], qui nécessite l'estimation de la dérivée temporelle, éventuellement bruitée, de la sortie y et dans [10], il est proposé une loi de commande, dite « para-modèle », qui substitue l'usage de la dérivation en y par une fonction d'initialisation

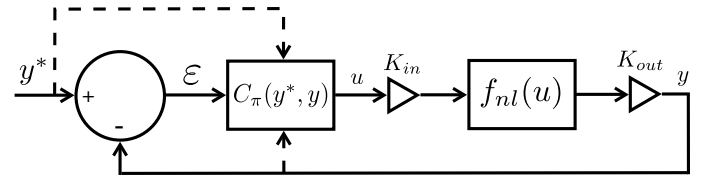


Fig. 3. Schéma global de l'asservissement proposé.

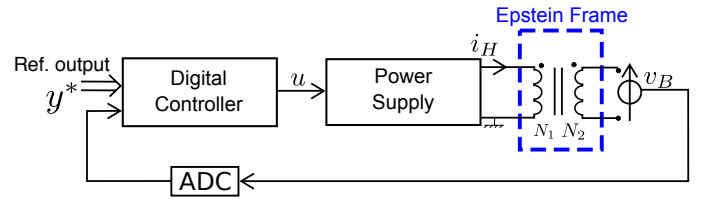


Fig. 4. Synoptique général de l'asservissement numérique du cadre Epstein.

de nature exponentielle.

2.2. Présentation

Considérons un système dynamique non-linéaire f_{nl} "Single Input Single Output" (SISO) à contrôler :

$$u \mapsto y, \quad \begin{cases} \dot{x} = f_{nl}(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

La commande proposée « para-modèle » de type « sans modèle » est une application $C_\pi : (y^*, y) \mapsto u$ dont le but est de contrôler la sortie y de (3) par le pilotage de l'entrée u et en considérant une consigne de référence y^* . Le schéma général de l'asservissement, incluant le contrôleur C_π , est donné par la Fig. 3. Pour tout instant t_k , $k \in \mathbb{N}^*$, on définit le contrôleur discret C_π tel que symboliquement :

$$u_k = \int_0^t K_I \varepsilon_{k-1} d\tau \Big|_{k-1} \{u_{k-1} + K_p(\alpha e^{-\beta k} - y_{k-1})\} \quad (4)$$

où y^* est la trajectoire de référence ; K_p et K_I sont deux gains réels positifs ; $\varepsilon_{k-1} = y_{k-1}^* - y_{k-1}$ est l'erreur de poursuite ; $\alpha e^{-\beta k}$ est une fonction d'initialisation avec les constantes réelles α et β .

Pratiquement, un ajustement des paramètres du correcteur, suivant le modèle numérique à contrôler, peut être effectué en

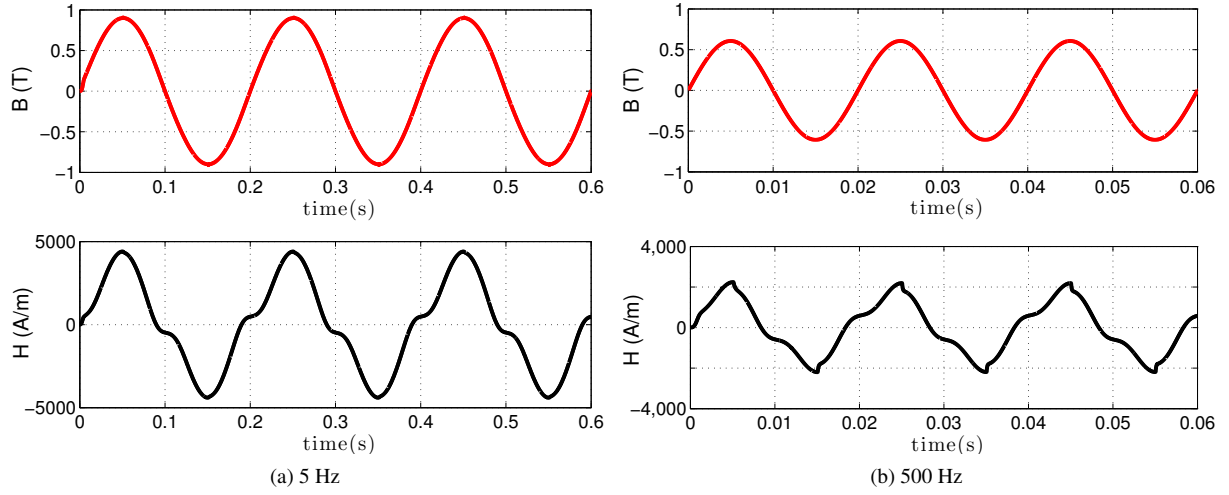


Fig. 5. Exemple de simulation de $u = H$ [A/m] et $y = B$ [T] en fonction du temps.

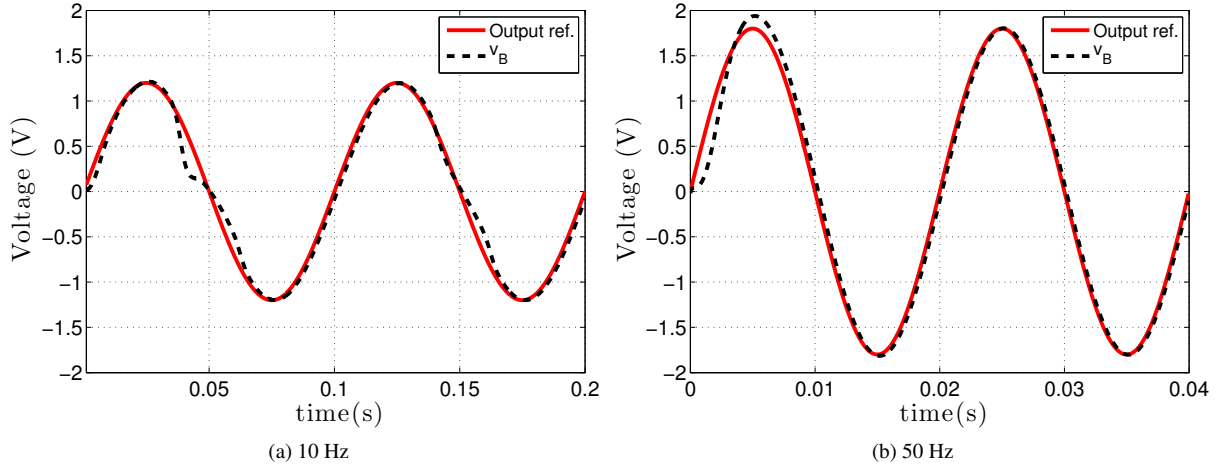


Fig. 6. Performances mesurées en régime sinusoïdal asservi en quasi-statique (10 Hz) et en dynamique (50 Hz). Output ref. désigne la consigne.

s'appuyant sur une procédure d'optimisation. Le but est d'améliorer la « proximité » de la réponse y avec la consigne de référence y^* en minimisant, par exemple, l'erreur quadratique de poursuite. Pour ce faire, il est possible d'utiliser, par exemple, une méthode méta-heuristique, telle que la méthode dite du « recuit simulé » [12] ou bien une stratégie basée sur de l'optimisation sans dérivées telle que, entre autres, la "Brute Force Optimization" récemment mise au point [13].

2.3. Implémentation pratique

La Fig. 4 présente le synoptique général de l'asservissement numérique proposé. Le contrôleur C_π est programmé au sein d'une application LabVIEW, qui pilote une alimentation linéaire de puissance régulée en tension via la grandeur u ; cette alimentation fournit le courant magnétisant i_H . La tension v_B est mesurée et numérisée pour fournir l'information de "feedback" y pour le contrôleur C_π .

3. SIMULATION

Dans cette section, une étude préliminaire de l'asservissement « sans modèle » proposé est menée par simulation. En effet, il s'agit, dans un premier temps, d'asservir directement B à une consigne sinusoïdale en pilotant i_H (donc H). Pour ce faire, le cadre Epstein est remplacé par un système dynamique non-

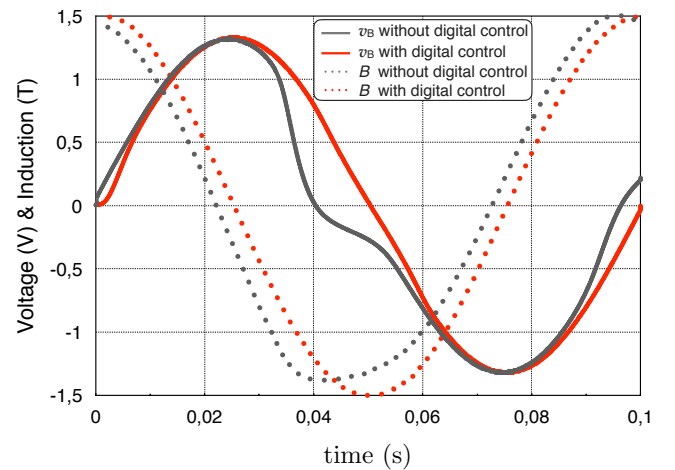
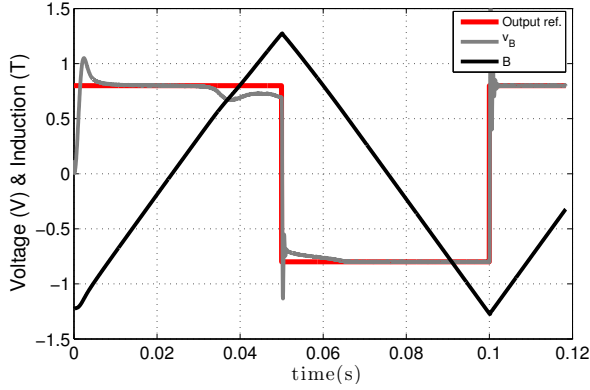
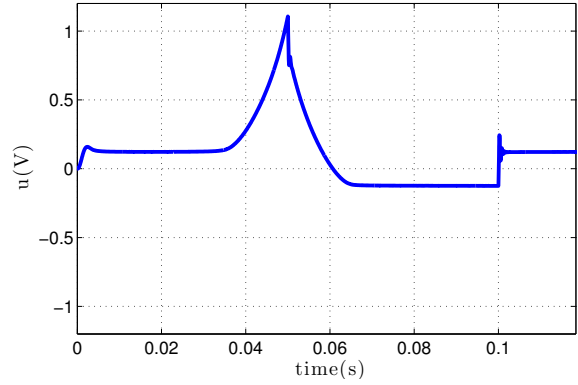


Fig. 7. Mesures de la tension v_B et de l'induction B à 10 Hz avec et sans asservissement en régime sinusoïdal. Le facteur de forme FF_{v_B} est nettement amélioré avec asservissement (passage de 6, 1% à 0, 53%).

linéaire $f_{BH}(i_H)$ décrivant le cycle d'hystérésis $B(H)$ en fonction du courant i_H . Le modèle d'hystérésis de Jiles-Atherton

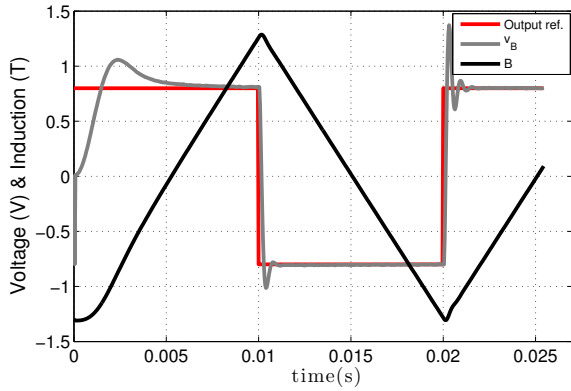


(a) Mesures de v_B et B asservies

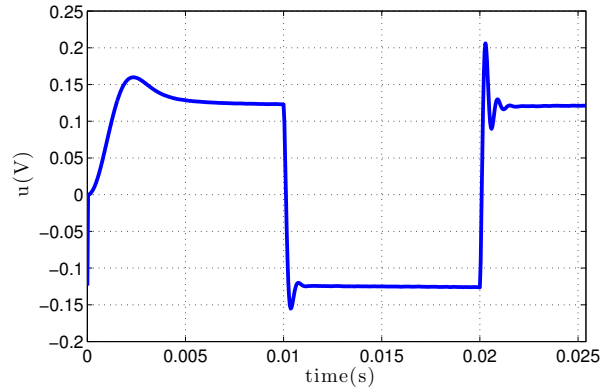


(b) entrée u

Fig. 8. Régime asservi à 10 Hz pour une consigne rectangulaire.



(a) Mesures de v_B et B asservies



(b) entrée u

Fig. 9. Régime asservi à 50 Hz pour une consigne rectangulaire.

[14], [15] a été choisi pour décrire la fonction $f_{nl}(x, u)$ de la boucle fermée de la Fig. 3. On considère ainsi $i_H = K_{in} u$, $y = K_{out} v_B$ et un coefficient K_e tel que le modèle numérique d'hystérésis s'écrit :

$$y = f_{JA}(u) = K_{in} K_e u + K_{out} f_{BH}(K_{in} u) \quad (5)$$

La simulation numérique en consigne sinusoïdale est présentée dans la Fig. 5, qui décrit l'entrée $u = H$ et la sortie $y = B$ (parfaitement sinusoïdale) en fonction du temps en régime quasi-statique (5 Hz) et dynamique (500 Hz). On considère ainsi un cas particulier d'hystérésis magnétique défini pour une fréquence donnée et on cherche à asservir B à une consigne y^* .

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans le but de quantifier les performances de l'asservissement proposé, une tension périodique v_{carte} est envoyée sur le primaire du cadre. Cette tension, appelée également *trame d'asservissement*, est composée de n_i périodes d'initialisation et de n_e périodes d'étude, soit $n_i + n_e$ périodes au total. La forme de la trame d'asservissement est identique à la forme de la consigne d'asservissement. On distingue deux cas de mise en service de l'asservissement : soit il est immédiatement démarré i.e. dès la première période, soit il est démarré au début de la n_e ème période, ce qui a pour effet d'amortir les effets non-linéaires dus au transitoire magnétique, lequel est « absorbé » par les premières n_i périodes. Les deux cas ont été investigués et nous présentons dans cet article les résultats qui donnent les meilleures performances d'asservissement.

4.1. Consigne de type sinusoïdale

La Fig. 6 présente l'allure de la tension v_B asservie à une consigne sinusoïdale en régime quasi-statique (10 Hz) (Fig. 6a) et dynamique (e.g. à 50 Hz) (Fig. 6b). Les performances de l'asservissement numérique proposé, en termes de tension et d'induction, sont comparées au fonctionnement en boucle ouverte (sans asservissement) et les résultats sont présentés dans la Fig. 7 à 50 Hz. Notons qu'en boucle ouverte, un offset de tension apparaît ; ce dernier dépend du réglage de l'alimentation de puissance et il est absorbé par la régulation en boucle fermée.

4.2. Consigne de type rectangulaire

Les Fig. 8 et 9 montrent les performances en boucle fermée mesurées respectivement à 10 et 50 Hz dans le cas d'une consigne de type rectangulaire. Nous observons clairement l'amélioration du suivi de consigne rectangulaire en présence de l'asservissement contrairement aux fortes déformations de v_B observées en boucle ouverte (voir Fig. 2). La qualité du suivi de consigne se traduit par une induction B , obtenue après intégration de la tension v_B , très proche d'une forme triangulaire. Concernant la dynamique du signal de commande u , illustrée à 10 Hz dans la Fig. 8b, on peut remarquer que u augmente exponentiellement avant la fin de la demi-période à cause de la forte chute de tension sur v_B que l'asservissement tente de compenser. De manière similaire pour le cas sinusoïdal, les chutes de tension sur v_B sont compensées de la même façon par le correcteur.

5. CONCLUSIONS

Nous avons présenté la mise en œuvre d'un asservissement de type « sans modèle » pour le contrôle des grandeurs magnétiques d'un banc de caractérisation de matériaux doux. Cette commande est basée sur le développement d'une commande sans modèle, qui assure de bonnes performances dynamiques en régulation sans pour autant connaître le système contrôlé. Les résultats expérimentaux ont permis de valider les résultats de simulation et montrent que la stabilité de l'asservissement est préservée malgré les fortes non-linéarités que présente le cadre Epstein. En outre, le facteur de forme est significativement diminué grâce aux bonnes performances dynamiques pour les consignes sinusoïdale et rectangulaire étudiées.

Les futurs développements devraient s'orienter vers un réglage adaptatif des coefficients d'asservissement en fonction du matériau considéré et de la fréquence de la consigne d'asservissement.

6. REMERCIEMENTS

Cette étude est financée par le projet COCTEL (Conception Optimale des Chaines de Traction Électrique) piloté par RENAULT-SAS et accompagné par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie).

7. RÉFÉRENCES

- [1] G. Bertotti, E. Ferrara, F. Fiorillo, M. Pasquale, « Loss measurements induction waveform on amorphous alloys under sinusoidal using a digital feedback technique », *J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 10, May 1993.
- [2] F. Fiorillo et F. Mazaleyrat, « Mesures magnétiques - Mesurage des propriétés magnétiques des matériaux », *Techniques de l'ingénieur*, no. D1505, pp. 1-16, 2009.
- [3] Y. Zhang, Y. Long, Q. Qu, R. Ye, Y. Chang, « Precise AC magnetic measurement under sinusoidal magnetic flux by using digital feedback of harmonic compensation », *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 312, pp. 443-448, 2007.
- [4] S. Zurek, P. Marketos, T. Meydan, A. J. Moses, « Use of novel adaptive digital feedback for magnetic measurements under controlled magnetizing conditions », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 11, pp. 4242-4249, Nov. 2005.
- [5] K. Matsubara, N. Takahashi, K. Fujiwara, T. Nakata, M. Nakano, H. Aoki, « Acceleration technique of waveform control for single sheet tester », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 6, pp. 3400-3403, Nov. 1995.
- [6] M. Fliess and C. Join, « Commande sans modèle et commande à modèle restreint », *e-STA*, vol. 5, no. 4, pp. 1-23, 2008 (available at <http://hal.inria.fr/inria-00288107/en/>).
- [7] M. Fliess and C. Join, « Model-free control », *International Journal of Control*, vol. 86, no. 12, pp. 2228-2252, Jul. 2013 (available at <http://arxiv.org/pdf/1305.7085.pdf>).
- [8] K.J. Åström and P.R. Kumar, « Control : A perspective », *Automatica*, vol. 50, no. 1, pp. 3-43, Jan. 2014.
- [9] L. Michel, C. Join, M. Fliess, P. Sicard and A. Chériti, « Model-free control of dc/dc converter », in *2010 IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, pp.1-8, June 2010 (available at <http://hal.inria.fr/inria-00495776/>).
- [10] L. Michel, « A para-model agent for dynamical systems », preprint arXiv, Jan 2016 (available at <http://arxiv.org/abs/1202.4707>).
- [11] L. Michel, « Contrôler les transferts en automatique », *Tangente SUP 70-71 "Transfert et échange"*, Editions POLE, pp. 72-78, juill. 2013.
- [12] R.W. Eglese, « Simulated annealing : A tool for operational research », *European Journal of Operational Research*, vol. 46, no. 3, pp. 271-281, Jun. 1990.
- [13] M. Porcelli, Ph. L. Toint, BFO, « A trainable derivative-free Brute Force Optimizer for nonlinear bound-constrained optimization and equilibrium computations with continuous and discrete variables », *Namur Center for Complex Systems, In Support, Tech. Reports*, no. naXys-06-2015, Belgium, Jul. 2015. [Online]. Available : http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2015/07/4986.pdf
- [14] D.C. Jiles, « Modeling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, No. 6, pp. 4326-4328, Nov. 1994.
- [15] D. C. Jiles, « Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials », *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 10, pp. 5849, Nov. 1994.